مطالعه عوامل مؤثر بر مقدار کلر بحرانی یک سازه بتنی قدیمی آسیب دیده در جزیره کیش

محمد شکرچی زاده*[۱] و فرهاد پرگر[۲]

[۱]استاديار دانشكده مهندسي عمران - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران

[۲]دانش آموخته كارشناسي ارشد سازه اي هيدروليكي - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران

(تاريخ دريافت ۸۵/۳/۷ , تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۶/۳/۳۰ , تاريخ تصويب ۸۷/۵/۱۲)

چكيده

خوردگي آرماتورها در بتن از جمله رايج ترين خرابي ها در منطقه خليج فارس است. دو عامل موجب خوردگي آرماتور مي‌شود: يكي حضور يون كلر و ديگري كاهش pH محيط اطراف آرماتور (كربناتاسيون). مقدار كلر بحراني براي شروع خوردگي آرماتور در بتن يكي از عواملي است كه امروزه توجه بسياري از محققين را به خود جلب نموده است و در مدل هاي نرم افزاري مربوط به تعيين عمر مفيد سازه هاي بتني، دست يابي به آن اهميت بسزائي دارد. در اين مقاله مقدار كلر بحراني در يک سازه بتني قديمي واقع در جزيره كيش مورد بررسي قرار گرفت. عمق كربناتاسيون, پروفيل يون كلر و مقدار كلر در سطح مشترک آرماتور و بتن تعيين شد و با مقايسه نتايج، مقدار كلر بحراني بر حسب درصد وزني بتن به دست آمد. نتايج حاصل, در يک نرم افزار مربوط به پيش بيني عمر مفيد سازه هاي بتني در خليج فارس مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

واژه هاي كليدي : خوردگي - بتن - آرماتور - كلر بحراني - كربناتاسيون

مقدمه

بتن يكي از مصالح بالنسبه ارزان و پايا در محيط هاي دريايي مي‌باشد كه مي‌توان با قالب بندي آن را به هر شكل هندسي مورد نظر در آورد. اما در بعضي موارد به دلايل طراحي ضعيف، ضعف در اجرا، كيفيت نامرغوب مصالح و شرايط محيطي لحاظ نشده در طراحي و يا تركيبي از اين عوامل، سازه بتن آرمه ساخته شده كارآيي مورد نظر را در دوره عمر مفيد خود نخواهد داشت. در سال هاي اخير تعداد زيادي از سازه هاي بتني در مناطق دريايي كشورهاي مختلف دنيا در اثر اين عوامل دچار آسيب ديدگي و يا خرابي زودرس شده اند. خوردگي آرماتورها در بتن از جمله رايج ترين اين خرابي‌ها در سازه هاي بتن آرمه بوده و يكي از مهم ترين مشكلاتي است كه مهندسان عمران امروزه در نگهداري سازه هاي بتن آرمه با آن مواجه مي‌باشند. در آمريكا خسارات ناشي از خوردگي بر اثر نمك هاي يخ زدا و آب دريا در پل‌هاي بتني، ۱۵۰ ميليارد دلار در سال بر آورد شده است. در گزارشي كه در سال ۱۹۹۱ در مركز تحقيقات حمل و نقل آمريكا تهيه گرديده است، هزينه سالانه تعمير عرشه پل‌هاي خورده شده در برابر نمك‌هاي يخ زدا ۵۰ تا ۲۰۰ ميليون دلار و ۱۰۰ ميليون دلار نيز براي تعمير ديگر اجزاي سازه‌اي آن تخمين زده شده است. در انگلستان نيز خسارات ناشي از خوردگي پل‌هاي بتن آرمه راهها ۶۱۵/۵ ميليون پوند در سال مي‌باشد. لازم به توضيح است كه اين خسارات فقط مربوط به ۱۰ درصد از پل‌هاي آن كشور مي‌باشد. بنابراين خسارات مالي كل پل‌هاي انگلستان ۱۰ برابر اين مبلغ پيش بيني شده است. آمارها در ديگر نقاط دنيا مانند اروپا ، آسيا و استراليا نيز نتايج مشابهي را بيان مي نمايند[۲].

متأسفانه، مشاهدات و گزارش‌ها نشان مي‌دهند كه در ناحيه جنوبي كشور ما، هنوز سازه هايي با كيفيت اجراي ضعيف و عدم دقت كافي در مراحل انتخاب مصالح و روش‌هاي ساخت و بدون توجه به شرايط آب و هوايي منطقه احداث مي‌شوند به گونه اي كه ساليانه سرمايه هاي هنگفتي در اين منطقه بر اثر ساخت و ساز نامناسب به هدر مي روند. از طرف ديگر، شرايط خاص آب و هوايي منطقه (دما و رطوبت زياد) باعث مي‌شود كه كارآيي عوامل اجرا و نظارت و نيز توجه لازم براي ساخت بتن با كيفيت مطلوب كاهش يابد. همچنين آلودگي مصالح منطقه با مواد مضر و زيان آور براي بتن، خود عامل مهم

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۲۹۵۰ , فاكس : ۶۶۴۰۳۸۰۸ , Email: shekarch@ut.ac.ir

ديگري در خرابي سازه هاي بتني اين منطقه به حساب مي آيد. علي رغم اين كه به منظور افزايش كيفيت ساخت در منطقه، در آيين نامه بتن ايران بخشي با عنوان بتن ريزي در هواي گرم نيز پيش بيني شده، ولي به علت ماهيت آيين نامه اي بودن آن، چندان وارد جزئيات نگرديده است. از طرف ديگر، بررسي‌هاي جامع به منظور تعيين علت خرابي سازه هاي بتني در منطقه و نيز تهيه گزارش عمل كرد انواع سازه ها با انواع مواد و مصالح متفاوت صورت نگرفته است تا از نتايج آن به صورت مستند بتوان استفاده نمود.

بنابراين, با توجه به اين كه مسئله عدم پايايي بتن در محيط‌هاي خـورنده يكي ازمشكـلات اساسي در دنيا بوده و خوردگي ميلگردها ناشي از نفوذ يون كلر از عوامل مهم تأثير گذار بر پايايي آن مي‌باشد، در سال‌هاي اخير مطالعاتي گسترده براي حل مشكلات ناشي از آن انجام شده است و اين در حالي است كه در مملكت ما با وجود دارا بودن خورنده ترين محيط دريايي در دنيا، تحقيقات جامعي در اين خصوص صورت نگرفته است. در بررسي ۱۰۰ سازه بتن آرمه در خليج فارس مشخص گرديد كه عمر مفيد اين سازه ها ۱۰ تا ۲۰ سال خواهد بود در صورتي كه اين سازه‌ها براي عمر مفيد ۱۲۰ سال طراحي شده بودند [۳].

براي شروع خوردگي آرماتور در بتن تحت اثر يون كلر بايد مقدار كلر به حدي برسد كه به آن كلر بحراني مي گويند. ميزان كلرايد بحراني يكي از عوامل مورد نياز براي پيش بيني طول عمر سرويس دهي سازه هاي بتني مي‌باشد. مهم ترين مشكلي كه در تعيين اين عامل وجود دارد اين است كه كلر بحراني، كه خوردگي فعال ايجاد مي‌نمايد يک عامل مستقل تنها نبوده و به متغيرهاي مختلفي بستگي دارد.

در اين مقاله به بررسي مقدار كلر بحراني در يكي از قديمي‌ترين سازه هاي جزيره كيش مي پردازيم كه داراي سيستم بتني با سقف يك پارچه مي‌باشد, فاصله آن از دريا حدود ۲۰۰ متر است و از نظر ارتفاعي، اختلاف چنداني بين رقوم كف سازه و ساحل دريا به نظر نمي‌رسد.

براي تعيين مقدار كلر بحراني آزمايش‌هاي زير انجام گرفته است:

- تعيين عمق كربناتاسيون
- تهيه نيمرخ يون كلر
- ارزيابي عيني وضعيت آرماتورها
- تعيين مقدار كلر در سطح مشترک فولاد و بتن

نتايج حاصل از اين مطالعه در نرم افزار تعيين عمر مفيد سازه هاي بتني در منطقه خليج فارس (DuraPGulf) مورد استفاده قرار خواهند گرفت [۴].

خواص بتن [۵،۶]

فلیائیت

بتن ماده اي متشكل از سيمان، سنگ دانه, آب و مواد افزودني است. هيدراتاسيون سيمان پرتلند شامل هيدراته شدن فازهاي آلومينياتي و در ادامه واكنش اجزاي C_2S، C_3S و آب آزاد است كه منجر به تشكيل C-S-H و هيدروكسيدكلسيم، اترينگات و ديگر تركيبات مي‌شود ضمن اين كه واكنش‌هاي مذكور منجر به تشكيل اجزاي مستقل، پركردن حفرات مويينه، چسباندن سنگ دانه ها به يك ديگر، گسترش و تشكيل يك ريزساختار محكم و افزايش مقاومت مي‌شوند. محلول درون حفره اي بتن به دليل حضور هيدروكسيد كلسيم و مقدار كمي Na_2O و K_2O , داراي pH بين ۱۲ تا ۱۴ مي باشد. سيمان پرتلند هيدراته شده ممكن است شامل ۱۵ تا ۳۵ درصد وزني هيدروكسيد كلسيم براساس وزني سيمان باشد. اين مقدار، بدون در نظر گرفتن ميزان رطوبت, معمولاً براي نگهداشتن pH محلول حفره‌اي در حدود ۱۳ كافي است. قليائيت بتن ممكن است از چندين راه كاهش يابد; خروج نمك‌هاي قليايي همراه با آب از بتن و واكنش با دي اكسيد كربن (كربناتاسيون), به عنوان فرآيندهاي متداولي كه منجر به كاهش pH بتن مي‌شوند، اشاره نمود.

انتقال ذرات مهاجم

در خـوردگي فـولاد سـه عامـل انتشـار اكسـيژن، كربناتاسيون و انتشار يون كلر مي‌تواند مؤثر باشد. بـتن بـا كيفيت خوب مانع فيزيكـي بـراي جلـوگيري از خـوردگي ناشي از انتشار كلر و كربناتاسيون است و وجود اكسيژن را كـه يـك واكـنش دهنـده در فرآينـد خـوردگي در سـطح آرماتور است به حداقل مي‌رساند و همچنين ميزان رطوبت بتن و در نتيجه آهنگ فرآيند انتشـار را تحـت تـأثير قـرار مي‌دهد. براي مثال، آهنگ انتشار اكسيژن در بـتن اشـباع نسبت به بتن نيمه خشك كمتر مي باشد. ترك خـوردگي بتن موجب تسريع خوردگي آرماتور در بتن شده و موجـب

حضور آسان تر يون‌هاي كلر، دي اكسيد كربن، رطوبت، اكسيژن در سطح آرماتور مي‌شود. ترك‌ها مي‌توانند در نتيجه چند فرآيند شيميايي و فيزيكي مانند: جمع شدگي، واكنش‌هاي قليايي سنگدانه ها يا واكنش سولفات و سيكل‌هاي يخ زدن و ذوب شدن، به وجود آيند كه به هيچ عنوان به خوردگي آرماتور مربوط نيستند

خوردگی فولاد دربتن

هرگاه يك فلز يا يك آلياژ در حالتي كه شرايط خوردگي فراهم باشد، از خود مقاومت نشان دهد، اصطلاحا" گفته مي‌شود كه آن فلز يا آلياژ در آن شرايط حالت مقاوم دارد. به عبارت ديگر مقاوم‌شدگي به معناي كاهش فعاليت شيميايي ناشي از حضور يك اكسيدكننده قوي است كه منجر به تشكيل يك لايه محافظ نازك بر روي سطح فلز مي‌شود. مقاوم شدگي فولاد در بتن در صورتيكه كلر در بتن وجود داشته باشد يا از محيط خارجي به داخل آن نفوذ نمايد، شكسته خواهد شد. همچنين كاهش در pH ناشي از واكنش بين قليايي هاي بتن و دي اكسيد كربن موجود در اتمسفر مي‌تواند مقاوم شدگي را تحت تأثير قرار دهد.

خوردگي شامل دو فرآيند است كه عبارتند از، فرآيند آندي، جائي كه اكسيد شدن اتفاق مي‌افتد و فرآيند كاتدي جايي كه احيا شدن اتفاق مي‌افتد. همچنين براي خوردگي, هدايت كننده الكتريكي (ميلگرد) و الكتروليت (رطوبت) لازم است. آند و كاتد در بتن آرمه مي‌تواند در يك ميلگرد يا در دو ميلگرد مجزا باشد. رطوبت بتن يك مسير الكتروليتي را براي انتقال الكترون از آند به كاتد فراهم مي‌آورد. ميلگرد هدايت كننده الكتريكي است كه پيل خوردگي را تكميل مي‌كند. خوردگي فولاد مسلح كننده در محيط قليايي بتن شامل واكنش‌هاي آندي و كاتدي زير است كه منجر به ايجاد حالت مقاوم در ميلگرد مي شود. واكنش آندي شامل اكسيد شدن آهن و توليد اكسيد فريك يا اكسيد فروس است و واكنش كاتدي شامل احيا شدن مي‌باشد كه در نتيجه آن يون هيدروكسيل توليد مي‌شود [۶].

واكنش آندی:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+}+2e^{-} \quad (۱)$$

$$Fe^{2+}+OH^{-},O_2 \text{ and } H_2O \rightarrow Fe(OH)_2, \quad (۲)$$

$$\alpha\text{-}FeOOH\ ,\ \gamma\text{-}\ FeOOH\ ,\ Fe_3O_4\ ,\ \alpha\text{-}Fe_2O_3$$

واكنش كاتدی:

$$1/2O_2+H_2O+2e^{-} \rightarrow 2OH^{-} \quad (۳)$$

شكل(۱) فرآيند خوردگي فولاد تحت اثر يون كلر را در بتن نشان مي دهد.

مكانيزم حمله كلر به آرماتور

سه تئوري درباره اثر يون كلر برروي آرماتور وجود دارد[۹].

تئوري لايه اكسيد – اين تئوري بيان گر اين مطلب است كه لايه پايدار زنگ در حفاظت آرماتور در برابر خوردگي نقش دارد و فرض مي‌كند كه يون‌هاي كلر نسبت به يون‌هاي ديگر (مثل SO_4^{--}) راحت تر در اين لايه نفوذ مي‌كنند. در نتيجه يون‌هاي كلر ممكن است موجب كلوئيدي شدن لايه اكسيد و پراكنده شدن آن شوند و در نتيجه خوردگي راحت تر رخ مي‌دهد.

تئوري جذب – براساس اين تئوري يون‌هاي كلر در رقابت با اكسيژن محلول (O_2) و يون‌هاي هيدروكسيل برروي ميلگرد جذب مي‌شوند و هيدراتاسيون يون‌هاي آهن را گسترش مي‌دهند و بنابراين خوردگي آرماتور را تسهيل مي‌كنند.

تئوري كمپلكس ناپايدار – برپايه اين تئوري، يون‌هاي كلر با جايگزيني به جاي يون‌هاي هيدروكسيل در تشكيل لايه مقاوم شركت مي‌كنند، كه در نتيجه آن هدايت پذيري و حلاليت افزايش يافته و بنابراين لايه مقاوم خاصيت حفاظتي خود را از دست مي‌دهد.

واكنش‌ها مطابق روابط زير مي باشد:

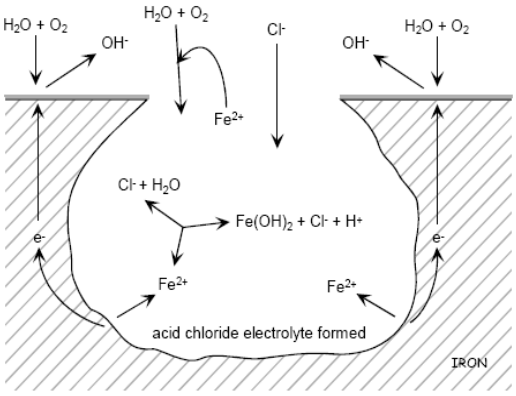
$$Fe(OH)_x+xCl^{-} \rightarrow FeCl_x+xOH^{-} \quad (۴)$$

و در ادامه داريم:

$$FeCl_x+xOH^{-} \rightarrow Fe(OH)_x+xCl^{-} \quad (۵)$$

كه در آن x از ۲ تا ۳ مي‌باشد (برپايه حالت اكسيداسيون آهن). مصرف يون‌هاي كلر در معادله (٤) توسط معادله (۵) و با آزاد كردن يون‌هاي كلر به تعادل مي‌رسد. حضور يون‌هاي كلر موجب تسريع در از بين رفتن لايه اكسيد آهن پايدار مي‌شوند و اين زنجيره واكنش‌ها هم چنان ادامه پيدا مي‌كند. توليد $FeCl_x$ به دليل حلاليت بسيار زياد آن موجب افزايش از بين رفتن لايه اكسيد مقاوم مي‌شود. توزيع غير يكنواخت يون‌هاي كلر در سطح آرماتور و ضعف لايه اكسيد آهن پايدار موجب مي‌شود تا كلر بتواند به راحتي اين لايه را به صورت موضعي از بين برده و خوردگي را تسريع نمايد.

آند, ناحيه اي است كه در آن آهن مي‌تواند به آساني در يك پتانسيل نسبتاً كم در الكتروليت حل شود. ناحيه غيرفعال باقي مانده به عنوان كاتد عمل مي‌كند كه در آن احياي اكسيژن در پتانسيل بالاتر رخ مي‌دهد. افزايش حجم اكسيدهاي آهن هنگامي كه به اكسيد بالاتر منتقل مي‌شوند, مهم ترين عامل ترك خوردگي بتن است . حجم اكسيدهاي آهن هيدراته شده مي‌تواند از شش تا هفت برابر بزرگ تر از آهن در شرايط عادي باشد.



شكل ۱: فرآيند خوردگي فولاد در بتن تحت اثر يون كلر [15].

كلر آزاد و مقيد

يون كلر در داخل بتن پس از نفوذ به دو صورت مي‌تواند وجود داشته باشد:

۱ – كلر آزاد كه در آب حفره اي بتن محلول مي ماند.

۲ – كلر پيوندي كه مي‌تواند به دو صورت فيزيكي و شيميايي با ديگر ذرات داخل بتن پيوند داشته باشد.

منابع متداول كلر عبارتند از [۷]:

- به كار بردن كلريد كلسيم به عنوان يك ماده تسريع كننده هيدراتاسيون خمير سيمان.
- به كار بردن سنگ دانه و آب آلوده به كلر در بتن.
- به كار بردن NaCl به منظور يخ زدايي سطح جاده‌ها در زمستان
- قرارگرفتن بتن در معرض آب دريا يا هواي آلوده به كلر در محيط‌هاي دريايي

خمير سيمان با مقيد كردن يون‌هاي كلر و تشكيل كريستال‌هاي $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.1H_2O$ (نمك فريدل) موجب عدم حركت آنها مي‌شود. ميزان C_3A خمير سيمان اثر قابل توجهي بر ميزان مقيد كردن كلر دارد. يون‌هاي كلر يا جذب شيميايي سطحي تبديل به C-S-H شده و يا در ساختار آن وارد مي‌شود. ميزان كلر مقيد شده بستگي به حضور ديگر يون‌ها دارد. براي مثال، سولفات‌ها، كربنات‌ها و كاتيون‌ها (Ca^{++},K^+,Na^+), دما و pH نيز از عوامل مؤثر مي باشند [۸].

از رايج ترين روش‌هاي موجود براي جدا سازي كلر، مي توان به روش انحلال در اسيد اشاره كرد. در اين روش پودر بتن مورد نظر بر اساس استاندارد در معرض اسيد نيتريك قرار مي‌گيرد و با تيتراسيون محلول حاصل، مقدار كلر آن تعيين مي‌گردد. اين روش سريع ترين روش موجود براي تعيين مقدار كلر در بتن مي‌باشد. در اين آزمايش تقريبا بيشتر يون‌هاي كلر موجود در بتن به صورت آزاد در مي آيند اما مقدار كمي از كلر به صورت مقيد باقي مي ماند. به اين ترتيب مقدار كلر حاصله با تقريب مناسبي مي‌تواند بيانگر كلر كل موجود باشد. البته اين روش دست پايين است و نتيجه آن به عواملي مختلفي مانند مقدار اسيد و دما بستگي دارد. در تحقيق حاضر از اين روش مطابق استاندارد ASTM C114 براي تيتراسيون نمونه ها استفاده شده است.

مكانيزم حمله دی اكسيد كربن به بتن

كربناتاسيون به خنثي شدن يا كاهش قليائيت بتن درنتيجه واكنش با CO_2 گفته مي‌شود. در اين عمل گاز CO_2 موجود در هوا يا محلول در آب (اسيد كربنيك) با هيدروكسيد كلسيم خمير سيمان واكنش داده و توليد كربنات كلسيم مي‌نمايد. عمق كربناتاسيون در بتن با كيفيت مناسب پس از چندين سال بيش از ۱/۲۵ ميليمتر نمي‌باشد. با اين وجود در بتن‌هاي با كيفيت كم و متخلخل، كربناتاسيون مي‌تواند موجب خوردگي ميلگرد شده و در نتيجه به ترك خوردگي و پوسته شدن بتن بيانجامد. عوامل متعددي بر آهنگ كربناتاسيون مؤثر مي باشند كه عبارتند از: حجم حفره ها، مقاومت بتن، در معرض رطوبت بودن يا سيكل‌هاي متناوب تر و خشك شدن و اختلاف دمائي دو طرف بتن. معمولاً زماني كه كربناتاسيون اصلي ترين عامل تخريب باشد، متناوباً رسوبات سفيد رنگي در اطراف سنگدانه‌ها و در سطوح داخلي ترك‌ها مشاهده مي‌شود [۱۰]. فعل و انفعالات مهم شيميايي مربوط به كربناتاسيون عبارتند از:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (۶)$$

يا:

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O \quad (۷)$$

مقدار دي اكسيد كربن مورد نياز به منظور كاهش pH بتن به مقدار محصولات قليايي هيدراتاسيون, يعني به موارد ذيل بستگي دارد [۱۱،۱۲]:

- تركيبات سيمان (نوع سيمان)
- مقدار سيمان در هر متر مكعب بتن

مقدار دي اكسيد كربني كه در واحد زمان به داخل بتن نفوذ مي‌كند، بستگي به نفوذپذيري بتن نسبت به گاز دي اكسيد كربن يعني به موارد ذيل بستگي دارد:

- تركيب بتن
- تراكم بتن
- شرايط عمل آوري بتن
- شرايط محيطي بتن

در شرايطي كه رطوبت نسبي محيط ثابت باشد، مي‌توان آهنگ كربناتاسيون را با ميزان رطوبت محيط مرتبط كرد. مقدار رطوبت نسبي بحراني حدود ۷۰-۶۰ درصد است. عمق كربناتاسيون در سازه هايي كه در معرض تر و خشك شدن متناوب هستند، ممكن است كمتر باشد. براي مثال، در ديوارهاي بيروني ساختمان، سرعت كربناتاسيون در قسمت‌هايي كه داراي سر پناه مي‌باشند، از قسمت‌هايي كه در معرض باران هستند، بيشتر است. همين طور سرعت كربناتاسيون در قسمت‌هاي بيروني ساختماني كه در معرض رطوبت قرار دارند، از نواحي داخلي كمتر است، به عنوان مثال، اگر در نيمي از يك سال بتن خشك و نيم ديگر همان سال بتن خيس باشد، عمق كربناتاسيون از حالتي كه بتن هر يك ماه در ميان در معرض خيس شدن باشد، بيشتر است [۱۳].

در بتن‌هايي كه مصالح آن آلوده به يون كلر مي‌باشند, كربناتاسيون باعث كاهش pH محيط و انحلال فازهاي جامد حاوي يون كلر مقيد در محلول حفره اي و در نتيجه آزاد شدن كلر و ايجاد كلر آزاد مي‌شود. كلر آزاد شده مي‌تواند وارد قسمت‌هاي كربناته نشده بتن گردد كه اين پديده موجب افزايش ميزان كلر آزاد در ضخامت پوشش بتني روي آرماتور شده و ممكن است كلر را در سطح ميلگرد به مقدار بحراني برساند. بنابراين سازه هاي حاوي يون كلر كه كربناتاسيون در آنها رخ داده است، نسبت به سازه هايي كه فقط از يک معضل رنج مي‌برند، بيشتر درمعرض خوردگي قرار دارند. Glass و Buenfeld نيز در تحقيقات خود به اين نتيجه رسيده اند كه كلر پيوندي مي‌تواند در شروع خوردگي نقش ايفا كند. به طوري كه قسمت بيشتر كلر پيوندي با كاهش pH به مقادير كمتر از ۱۲ آزاد مي‌شود [۱۴،۱۵،۶].

كلر بحراني براي شروع خوردگي فولاد در بتن

كلر بحراني داراي تعاريف مختلفي است كه چگونگي از بين رفتن حالت مقاوم فولاد در بتن را شرح مي‌دهد. برخي از محققين بر اين عقيده اند كه حالت مقاوم زماني از بين مي‌رود كه تغيير در پتانسيل ميلگرد رخ دهد [۱۶]. برخي ديگر مشاهده ظاهري را بكار برده و بر اين عقيده اند كه حالت مقاوم زماني از بين مي‌رود كه لكه‌هاي خوردگي بر روي ميلگرد ظاهر شود [۱۶،۱۷]. سرانجام، ديگر محققين رسيدن جريان خوردگي به مقداري مشخص را نشانه از بين رفتن لايه مقاوم فرض مي‌كنند [۱۸،۱۹،۲۰].

عوامل زيادي, از جمله موارد ذيل, مقدار كلر بحراني را تحت تاثير قرار مي‌دهد: درصدي از كلر كل كه به صورت آزاد وجود دارد، طرح اختلاط بتن، افزودني‌هاي شيميايي و معدني, ميزان C_3A سيمان، ميزان رطوبت موجود (باتوجه به محل قرارگيري)، شرايط اتمسفري (دما و مقدارررطوبت هوا)، pH محلول حفره اي، ميزان اكسيژن، نوع كاتيون‌هاي همراه كلر، شرايط سطحي، تركيبات ميلگرد و ريز ساختار آن [۱۵]. تمامي عوامل مذكور بر رفتار لايه پايدار و غير فعال ايجاد شده بر روي فولاد مؤثر بوده و در واقع پتانسيل الكتريكي ميلگرد را تعيين مي‌نمايد [۲۱].

تلفيقي از عوامل مؤثر باعث مي‌شود تا يک مقدار ثابت براي كلر بحراني وجود نداشته و كلر بحراني تابعي از مشخصه هاي اجزاي بتن و شرايط محيطي اطراف آن باشد. در ادامه به تأثير تعدادي از عوامل ذكر شده بر روي كلر بحراني مي پردازيم.

عامل اصلي قليائيت بتن، حضور يون‌هاي هيدروكسيل است كه موجب حفظ و گسترش لايه مقاوم روي آرماتور مي‌شود. اثر مثبت يون‌هاي هيدروكسيل بايد همراه با اثر منفي يون‌هاي كلر بر روي لايه مقاوم ديده شود. بنابراين به جاي در نظر گرفتن مقدار يون‌هاي كلر يا يون‌هاي هيدروكسيل به عنوان معياري براي از بين رفتن

لایه مقاوم، نسبت یون کلر به هیدروکسیل در نظر گرفته مي‌شود [۲۶].

کاهش نسبت آب به سیمان موجب افزایش مقدارکلر بحراني و pH محیط مي‌شود، درحالي که افزودن دوده سیلیس موجب کاهش pH محیط و در نتیجه کاهش مقدار کلر بحراني مي‌شود [۲۲].

وجود حفره هاي هواي تصادفي در سطح مشترك فولاد و بتن موجب کاهش مقدار کلر بحراني مي‌شود، چون مقدار هیدروکسید کلسیم و در نتیجه مقدار pH در این مناطق کمتر است [۲۳]. تجربه ها و آزمایش ها نشان مي دهد که با کاهش مقدار حفرات هواي تصادفي در سطح مشترك فولاد و بتن از ۱/۵ درصد به ۰/۲ درصد حجمي بتن, مقدار کلر بحراني از ۰/۲ درصد به ۲ درصد وزني سیمان افزایش مي‌یابد [۲۴].

افزایش در مقدار C_3A سیمان موجب افزایش pH محیط شده و در نتیجه موجب افزایش مقدار کلر بحراني مي گردد. نوع کاتیون‌هاي همراه کلر با تاثیر گذاشتن بر روي مقاومت الکتریکي بتن موجب افزایش و یا کاهش مقدار کلر بحراني مي‌شود [۲۵]. هم چنین افزایش مقدار C_3A سیمان موجب افزایش کلر پیوندي و تشکیل نمک فریدل مي‌گردد.

مطالعات نشان داده اند که شرایط سطحي میلگرد بر روي مقدار کلر بحراني بسیار تأثیر گذار بوده و در برخي از انواع میلگردها (ASTM A605) وجود پوسته ناشي از نورد گرم موجب بهبود شرایط سطحي و افزایش مقدار کلر بحراني مي‌شود، در حالي که در برخي دیگر از میلگردها (ASTM A706) حذف پوسته ناشي از نورد گرم موجب مي‌شود تا مقدار کلر بحراني افزایش یابد [۲۶]. همچنین درصورت وجود لایه هاي زنگ بر روي میلگرد قبل از قرار گرفتن در بتن مقدار کلر بحراني افزایش مي‌یابد [۲۵].

میزان کلر بحراني یکي از عوامل مورد نیاز براي پیش‌بیني طول عمر سرویس دهي سازه هاي بتني مي‌باشد. این مقدار کلر یک فاکتور مستقل تنها نبوده و به متغیرهاي مختلفي بستگي دارد. محققان اعداد مختلفي را براي کلر بحراني ذکر کرده اند. با این وجود توافق کاملي بر روي اعداد ارائه شده وجود ندارد. علت مشخص نبودن مقدار کلر بحراني به عواملي که بر روند آن تأثیر گذار مي باشد. بر اساس آیین نامه آبا [۱]، حداکثر مقدار یون کلر آزاد مجاز در سازه هاي بتني بر حسب درصد وزني سیمان به شرح زیر است:

- بتن آرمه پیش تنیده: ۰/۰۶
- بتن آرمه اي که در زمان بهره برداري در معرض رطوبت و کلر قرار دارد: ۰/۱۵
- بتن آرمه اي که در زمان بهره برداري در حالت خشک باشد یا از رطوبت محافظت شود: ۱
- سایر سازه هاي بتن آرمه: ۰/۳

تعیین مقدار کلر بحرانی در سازه بتنی

به منظور ارزیابي سازه و تعیین کلر بحراني در یکي از قدیمي‌ترین سازه هاي بتن آرمه جزیره کیش حدود یکصد پروفیل یون کلر در نقاط مختلف سازه طبق استاندارد ASTM C114 تهیه گردید. هم چنین عمق کربناتاسیون با استفاده از پاشیدن محلول فنل فتالئین بر روي مقطع بتن و تغییر رنگ بتن در منطقه اي که کربناته نشده اندازه گیري شد. فنل فتالئین در منطقه اي که pH بتن تقریبا" بیشتر از ۸/۵ باشد, به رنگ ارغواني در مي‌آید.

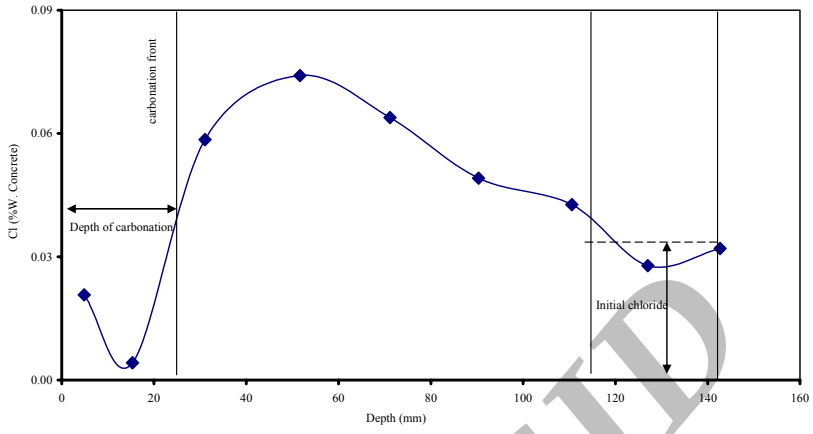
به منظور تعیین مقدار کلر در اطراف آرماتور, پوشش بتني روي آرماتور تخریب گردید. سپس با توجه به میزان خوردگي قابل مشاهده در اطراف آرماتور, محل‌هایي براي نمونه‌گیري مشخص و با دستگاه دریل که بر روي آن مته با قطر ۸ میلي متر نصب شده بود، از بتن چسبیده به آرماتور پودر تهیه شد. ضخامت پوشش بتن نیز در نقاط مختلف تعیین گردید.

با ملاحظه پروفیل یون کلر در بسیاري از نقاط بررسي شده در داخل ساختمان به نظر مي‌رسد که یون کلر موجود منشاء خارجي نداشته و در مرحله ساخت در مصالح اولیه موجود بوده است. به عبارت دیگر مقدار کلر نفوذ کرده از هوا, آب و خاک کم مي‌باشد.

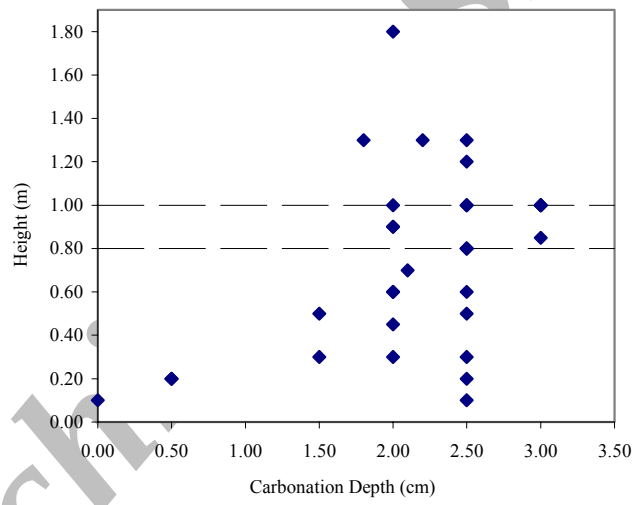
به نظر مي‌رسد در اکثر المان‌هاي سازه, در حدود ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ درصد وزن بتن یون کلر وجود دارد. این مقدار کلر موجود در بتن مي‌تواند به عنوان کلر اولیه تلقي گردد که از ابتداي احداث سازه به همراه مصالح ساخت بتن شامل سیمان, سنگ دانه ها و آب وجود داشته و اکنون در تمام المان‌هاي سازه موجود مي‌باشد.

شکل(۳) پروفیل یون کلر در یکي از نقاط داخلي سازه را نشان مي دهد که تحت اثر نفوذ یون کلر خارجي قرار نداشته ولي در معرض رطوبت است. همان گونه که در این شکل دیده مي‌شود, مقدار کلر تا عمق۲ سانتي متري

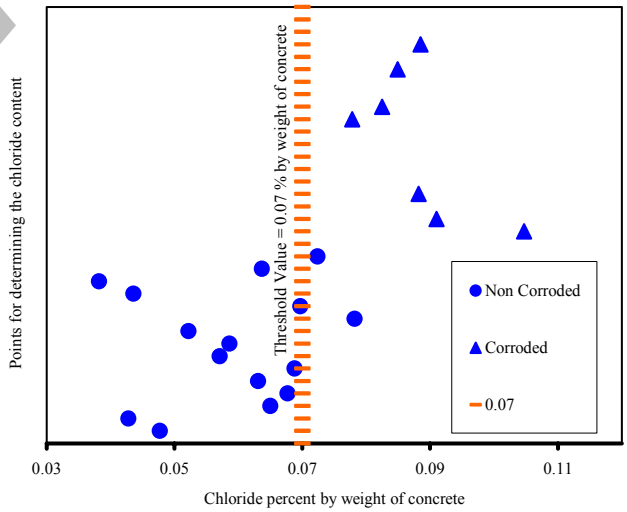
از سطح بتن کاهش یافته است که به دلیل تأثیر کربناتاسیون و آزاد شدن یون کلر می‌باشد، زیرا کربناتاسیون موجب آزادشدن یون کلر مقید شده و کلر آزاد شده می‌تواند به سمت داخل بتن حرکت نماید که در نتیجه آن، در عمق ۴/۵ سانتي متري مقدار حداکثر یون کلر دیده می‌شود. در این محل آرماتورها دچار خوردگي شده و جداشدگي در بتن رخ داده است.



شکل۲ : پروفیل یون کلر در دیوار داخلی.



شکل۳ : نمودار تغییرات عمق کربناتاسیون بر حسب فاصله از کف در المان‌های بررسی شده در زیر زمین سازه مورد بررسی.



شکل۴ : نمودار تغییرات مقدار کلر در نواحی خورده شده و بدون خوردگی.

نتیجه گیری

با مقایسه نتایج به دست آمده از پروفیل یـون کلـر و عمق کربناتاسیون در ارتفاع المان‌هاي سازه شـکل (۳) بـه دست مي‌آید. در این شـکل مقـدار عمـق کربناتاسـیون در ارتفاع دیوارهاي حائل و ستون‌ها رسم شـده اسـت. همـان طور که دیده مي‌شود, عمق کربناتاسیون در ارتفاع ۰/۶ تـا ۱ متر داراي بیشترین مقدار است. این پدیده احتمـالا" بـه دلیل وجود شرایط رطوبتي بهتر براي ایجـاد کربناتاسـیون در این محدوده مي‌باشد. با این وجود مي‌توان انتظار داشت که بیشترین مقدار خوردگي در این محدوده رخ دهد.

شکل (۴), نمودار مقدار کلر در کنار آرماتور در نواحي بدون خوردگي و خورده شده را نشان مي‌دهد. با مقایسه مقدار کلر در این نواحي مي‌توان نتیجه گرفت که مناسب‌ترین مقدار کلر براي شروع خوردگي حدود ۰/۰۷ درصد وزني بتن مي‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده در بالا مي توان نتیجه گیري نمود که کربناتاسیون موجب آزاد شدگي کلر پیوندي و ایجاد کلر آزاد عامل خوردگي مي‌شود. کلر آزاد شده به سمت داخل بتن حرکت کرده و مقدار کلر آزاد در اطراف آرماتور را افزایش مي‌دهد, که با رسیدن مقدار کلر به حدود ۰/۰۷ درصد وزني بتن خوردگي شروع مي‌شود.

تقدیر و تشکر

از زحمات استاد فقید آقاي دکتر قالیبافیان به خـاطر راهنمایي ارزشمند ایشان در اجراي پروژه و تنظیم گزارش و هم چنین آقاي مهندس حسیني به خـاطر همکـاري در اجراي پروژه قدرداني مي‌کنیم.

مراجع

1 - Ramezanianpour, A. A. and Pourkhorshidi A. (2005). “Code of practice for concrete durability in the Persian Gulf and Omman sea” Building and Housing Research Center, Tehran (in Persian).

2 - Hoseini, M. (2004). Effect of different surface coatings on the diffusion of the chloride ion into concrete in Persian Gulf region comparing with results of laboratory experiments and economical analysis for life cycle cost. MS Dissertation, University of Tehran.

3 - Moghadam, B. A. (2005). Study on time-dependent diffusion of chloride ion into concrete in different exposure conditions using various concrete coatings, MS Dissertation, University of Tehran.

4 - Alizadeh, R., Ghods, P., Chini, M., Hoseini, M. and Shekarchi, M. (2006). “Durability based design of RC structures in Persian Gulf region using DuraPGulf model." Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting – Alexander (eds.). South Africa. PP. 391-394.

5 - Richardson, M. G. (2002), Fundamentals of durable reinforced concrete, Spon Press.

6 - Benture, A., Diamond, S. and Berke, N. S. (1997). Steel corrosion in concrete, fundamentals and civil engineering practice, E & FN Spon.

7 - Page, C.L., Page, N. R. and El-Tarras, A. (1981). “Diffusion of chloride ions in hardened cement paste.” Cement and Concrete Research, Vol. 11, No.3, PP. 395-406.

8 - Andrade, C. (1993). “Calculation of chloride diffution coefficients in concrete from ionic migration measurements.” Cement and Concrete Research, Vol. 23, PP. 724-742.

9 - ACI Committee, 222 ACI 222R-85, (1985). “Corrosion metals in concrete.” American Concrete Institute, Detroit, MI.

10 - Kimberly, E. K. and Monteiro, P. (1999). Analysis of durability of advanced cementitious materials for rigid pavement construction in California. Report prepared for California Department of Transportation.

11 - Shamsad, A. (2003). “Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review.” Cement and Concrete Composites, Vol. 25, PP. 459–471.

12 - Schiessl, P. (1988), “Corrosion of steel in concrete.” Report of technical committee 60-CSC RILEM, CHAPMAN and HALL.

13 - Bertolini, L., Elsener, B., Pedeferr, P. and Polder, R. (2004). Corrosion of steel in concrete, Prevention, Diagnosis, Repair, Wiley-VCH.

14 - Liu, Y. (1996). Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures, PhD. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.

15 - U. S. department of transportation, (2000). Materials and methods for corrosion control of reinforced and prestressed concrete structures in new construction. Federal Highway Administration.

16 - Pourbaix, M. (1973). Lectures on electrochemical corrosion, Plenum Press, New York.

17 - Hope, B. B. and Ip, A. K. C. (1987). “Chloride corrosion threshold in concrete”, ACI Mater J, PP. 306-314.

18 - Goni, S. and Andrade, C. (1990). “Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides.” Cement and Concrete Research, Vol. 20, PP. 525- 539.

19 - Andrade, C. and Page, C. L. (1986). “Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts. A study of cation specific effects”, Cement and Concrete Research, Vol. 21, PP. 49-53.

20 - Gouda, V. K. (1970). “Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel”, Br Corros J. Vol. 5. PP. 198-203.

21 - Trejoa, D. and Monteiro, P. J. (2005). “Corrosion performance of conventional (ASTM A615) and low-alloy (ASTM A706) reinforcing bars embedded in concrete and exposed to chloride environments.” Cement and Concrete Research, Vol. 35. PP. 562–571.

22 - Alonso, C., Andrade, C. and Castellote, M. (2000). "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar." Cement and Concrete Research, Vol. 30, PP. 1047-1055.

23 - Poupard, O., Mokhtar, A. and Dumargue, P. (2004). “Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy.” Cement and Concrete Research, Vol. 34, PP. 991–1000.

24 - Glass, G. K. and Buenfeld, N. R. (1997). “The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete.” Corrosion Science, Vol. 39, PP. 1001-1013.

25 - Hansson, C. M. and Sorensen, B. (1990). The chloride threshold concenteration of chloride in concrete for the initiation of reinforcement corrosion, American Society for Testing and Materials, PP. 3-16.

26 - Ghods, P. Isgor, O. B., McRae, G. and Miller, T. (2009). "The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, PP. 2-11.